

УДК 624.014:620.179.16

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ТЕНЗОМЕТРИИ

Филиппова М. В., Богдан Г. А., Демченко М. А.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина

E-mail: [m.filippova@kpi.ua](mailto:m.filippova@kpi.ua); [amd.8@meta.ua](mailto:amd.8@meta.ua)

С целью усовершенствования метода определения фактических механических напряжений в металлоконструкциях предложено использование новой методики проведения их контроля при эксплуатации. В сравнении с существующими методами она имеет преимущества по точности получаемых результатов.

Целью работы является проведение теоретического исследования влияния внешних факторов окружающей среды на относительное изменение скорости акустического сигнала. и получение эмпирической зависимости напряжения в металлоконструкциях от времени прохождения поперечных волн в месте диагностики. В качестве значений скорости для ненагруженного материала предложено использование результатов прозвучивания на нейтральной линии профиля балки. Использование данной методики позволяет выявить действительные напряжения в элементах балочных металлоконструкций промышленных сооружений без разгрузки конструкции.

**Ключевые слова:** металлоконструкции, напряженное состояние, ультразвуковой контроль.

### Введение

Среди существующих методов неразрушающего контроля можно отметить отсутствие тенденции к появлению радикально новых методов определения напряжений в металле, а также поиска новых диагностических параметров. На существующих промышленных объектах, которые выполнены из металлоконструкций, уже давно наблюдается необходимость введения дополнительных методик проведения качественной диагностики напряженного состояния. Основной особенностью является то, что для этого типа объекта контроля нет возможности проводить разгрузку конструкции для установления действующих нагрузок, а также возможности применения динамических диагностических параметров.

Процесс определения напряженного состояния металла эксплуатируемых промышленных объектов должен производиться в очень сжатые сроки. Установление текущего значения напряжения позволит оценить условия эксплуатации объекта и в сравнении с полученными текущими значениями нагрузок позволит принимать решения о дальнейших действиях относительно существующих металлоконструкций.

Применение существующих методов акустического контроля для анализа напряженного состояния металла может быть расширено использованием новых способов реализации прозвучивания в применении к конкретному объекту контроля.

Анализ акустических методов [1, 3] показал, что существует ряд недостатков, которые влияют на точность контроля и диагностики в уже существующих методах и системах. Основными информатив-

ными параметрами для оценки напряженного состояния является скорость распространения нескольких типов акустических волн, что аналитически связано с упругими постоянными [2, 3, 4].

Одним из основных недостатков известных методов акустического контроля является необходимость получения начальных параметров скорости распространения акустической волны в материале, что соответствует материалу объекта контроля [2]. Таким образом, характеристики материала текущего объекта контроля не учитываются.

### Постановка задачи

Цель данной работы – получение зависимости влияния напряженного состояния металла на относительное изменение скорости акустической волны на примере элементов балочных металлоконструкций.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- оценить влияние внешних условий на изменение скорости акустического сигнала;
- вывести аналитическую зависимость влияния напряженного состояния металла на относительное изменение скорости акустического сигнала;
- получить экспериментальным путем акустические коэффициенты связи для относительного изменения скорости акустической волны от напряженного состояния металла.

### Анализ влияния внешних условий на относительное изменение скорости акустического сигнала

На изменение скорости акустического сигнала

ла влияет ряд внешних факторов, которые сопровождают процесс акустической диагностики.

Опираясь на экспериментальные данные и общие физические явления [7], зависимость относительного изменения скорости распространения акустического сигнала  $\delta v_{ik}$  может быть записана в расширенном виде:

$$\delta v_{ik} = f(\sigma_{in}, T, P_j, A_j, E_j, H_j), \quad (1)$$

где  $\sigma_{in}$  – тензоры напряжений;  $T$  – параметр абсолютной температуры среды;  $P_j$  и  $A_j$  – компоненты векторов силового и акустического полей;  $E_j$  и  $H_j$  – компоненты векторов электрического и магнитного полей.

Выбрав указанные величины в качестве независимых переменных, запишем для полного дифференциала  $\delta v_{ik}$ :

$$\begin{aligned} d(\delta v_{ik}) = & \left( \frac{\partial \delta v_{ik}}{\partial \sigma_{in}} \right)_{T, P_j, A_j, E_j, H_j} \times d\sigma_{in} + \\ & + \left( \frac{\partial \delta v_{ik}}{\partial T} \right)_{\sigma_{in}, P_j, A_j, E_j, H_j} \times dT + \\ & + \left( \frac{\partial^2 \delta v_{ik}}{\partial P_t \partial P_n} \right)_{\sigma_{in}, T, A_j, E_j, H_j} \times dP_t \times dP_n + \\ & + \left( \frac{\partial^2 \delta v_{ik}}{\partial A_t \partial A_n} \right)_{\sigma_{in}, T, P_j, E_j, H_j} \times dA_t \times dA_n + \\ & + \left( \frac{\partial^2 \delta v_{ik}}{\partial E_t \partial E_n} \right)_{\sigma_{in}, T, P_j, A_j, H_j} \times dE_t \times dE_n + \\ & + \left( \frac{\partial^2 \delta v_{ik}}{\partial H_t \partial H_n} \right)_{\sigma_{in}, T, P_j, A_j, E_j} \times dH_t \times dH_n + \\ & + \left( \frac{\partial \delta v_{ik}}{\partial \sigma_{in} \partial \sigma_{mj}} \right)_{T, P_j, A_j, E_j, H_j} \times d\sigma_{in} d\sigma_{mj} + \dots \quad (2) \end{aligned}$$

Для упрощения выражения и анализа вводятся ряд обозначений:

- матрица четвертого ранга изотермических линейных акустоупругих коэффициентов скорости  $\beta_{ikm}$ ;
- матрица второго ранга термоакустических коэффициентов скорости  $\eta_{ik}$ ;
- матрица четвертого ранга квадратичных силовых коэффициентов скорости контакта преобразователей  $p_{ikm}$ ;
- матрица четвертого ранга квадратичных коэффициентов скорости акустического давления  $a_{ikm}$ ;
- матрица четвертого ранга квадратичных электроупругих коэффициентов скорости  $e_{ikm}$ ;

- матрица четвертого ранга квадратичных магнитоупругих коэффициентов скорости  $h_{ikm}$ ;
- матрица шестого ранга изотермических квадратичных акустоупругих коэффициентов скорости  $\beta_{ikmnmj}$ ;

Используя приведенные обозначения, выражение (2) можно представить в упрощенном виде:

$$\begin{aligned} d(\delta v_{ik}) = & \beta_{ikm} d\sigma_{in} + \eta_{ik} dT + p_{ikm} dP_t dP_n + \\ & + a_{ikm} dA_t dA_n + e_{ikm} dE_t dE_n + h_{ikm} dH_t dH_n + \\ & + \beta_{ikmnmj} d\sigma_{in} d\sigma_{mj} + \dots \quad (3) \end{aligned}$$

Таким образом, рассмотрены дополнительные факторы  $p_{ikm}$ ,  $a_{ikm}$ , что сопровождающие процесс акустодиагностики [6]. Для одного материала часть компонент являются постоянными для одной среды. Поскольку, рассмотренные компоненты являются постоянными для каждого отдельного эксперимента, то в последующем могут быть заменены коэффициентами учета. При интегрировании (3) в линейном приближении получим:

$$\begin{aligned} \delta v_{ik} = & \beta_{ikm} (\sigma_{in} - \sigma_{in}^0) + \eta_{ik} \Delta T + p_{ikm} P_t P_n + \\ & + a_{ikm} A_t A_n + e_{ikm} E_t E_n + h_{ikm} H_t H_n \quad (4) \end{aligned}$$

где  $\sigma_{in}^0$  – тензор начальных напряжений.

При отсутствии внешнего воздействия выражение (4) имеет вид:

$$\delta v_{ik} = \beta_{ikm} (\sigma_{in} - \sigma_{in}^0). \quad (5)$$

В случае если  $\sigma_{in} \gg \sigma_{in}^0$ , начальным напряжением можно пренебречь, тогда выражение (5) можно привести к виду:

$$\delta v_{ik} = \beta_{ikm} \sigma_{in}, \quad (6)$$

что совпадает с результатами, представленными в работах [2, 6], и может быть записано для объемных волн в случае определения главных напряжений, следующим образом:

$$\delta v_{ik} = \beta_{ik}^x \sigma_{11} + \beta_{ik}^y \sigma_{22} + \beta_{ik}^z \sigma_{33}. \quad (7)$$

Необходимо также учитывать тот факт, что введение акустической волны может осуществляться под углом. В работе [7] эта проблема решается введением матрицы акустоупругих коэффициентов для каждого тензора напряжения:

$$\begin{aligned} \delta v_{\theta, \lambda}^R = & (\beta_{xy} \cos^2(\theta_\lambda) + \beta_{zx} \sin^2(\theta_\lambda)) \sigma_{11} + \\ & + (\beta_{zx} \cos^2(\theta_\lambda) + \beta_{xy} \sin^2(\theta_\lambda)) \sigma_{22} \quad (8) \end{aligned}$$

где коэффициенты скорости  $\beta_{ik}$  распространения ультразвука для одноосного напряженного состояния рассчитываются через упругие модули второго порядка Ламе ( $\lambda$ ,  $\mu$ ) и третьего порядка Мурнана ( $l$ ,  $m$ ,  $n$ ).

В общем виде уравнение акустической тензометрии для углового прозвучивания при определении одноосного напряжения может быть записано в виде линейной зависимости:

$$\delta v = \alpha \sigma_{zz}, \quad (9)$$

где  $\alpha$  – коэффициент пропорциональности:

$$\alpha = \alpha_R \times \alpha_P (\alpha_1 \cos^2 \theta + \alpha_2 \sin^2 \theta), \quad (10)$$

$\alpha_R$  – коэффициент, учитывающий толщину и плотность контактного слоя жидкости;

$\alpha_P$  – коэффициент, учитывающий силу прижима преобразователей (определяется способом крепления блока преобразователей на объект контроля);

$\alpha_1, \alpha_2$  – акустоупругие коэффициенты святи;

$\theta$  – угол ввода акустической волны.

Таким образом, расчет относительного изменения скорости акустической волны с учетом условий проведения ультразвуковой диагностики проводится по формуле:

$$\delta v = \alpha_R \alpha_P (\alpha_1 \cos^2 \theta + \alpha_2 \sin^2 \theta) \sigma_z, \quad (11)$$

В качестве основных ответственных элементов балок при промышленном строительстве используют профили нескольких типов. К таким профилям относят швеллеры, двутавры и тавры. При проектировании и строительстве обеспечивается схождение нейтральных линий профилей в одну точку, что предотвращает появление в балках кручения и обеспечивает только напряжение сжатия.

Среди основных элементов балочных металлоконструкций, что реализуются в ответственных конструкциях, используется несколько типов профилей. Эти профили определяются нормативными документами и могут быть выполнены как из проката, так и в качестве сварных элементов. К таким профилям относят швеллеры, двутавры и тавры. Основной конструктивной особенностью этих профилей является наличие поперечной осевой линии. При действии изгибающего момента напряжения по нейтральной линии отсутствуют. При проектировании и строительстве для предотвращения появления в балках кручения и обеспечения только напряжения растяжения-сжатия, обеспечивают в узлах конструкций схождение нейтральных линий профилей в одну точку. Распределение напряжений по высоте профиля убывает к нейтральной оси и его максимум достигается на полке балки, что и является основным местом диагностики.

Скорость прохождения сигнала через металл по линии прохождения нейтральной линии остается постоянной и равной скорости в полке без нагрузки. В связи с этим предложено использовать результаты прозвучивания в стенке балки как при ненапряженном состоянии. Это также позволит отказаться от предварительного получения скорости акустических волн в металле, а снимать их непосредственно в элементе контроля. Так как большая масса элементов выполнена из проката, то учитываются особенности профиля, полученные при его изготовлении.

Таким образом, связь параметров времени прохождения акустической волны, регистрируемых с величиной напряженного состояния, для

элементов балочных металлоконструкций представляется в формуле (11) через  $\delta v$ :

$$\sigma = \frac{1 - \frac{s}{t} \frac{t_1}{t_2}}{\alpha_R \alpha_P (\alpha_1 \cos^2 \theta + \alpha_2 \sin^2 \theta)}, \quad (12)$$

где  $t_1$  – время прохождения волны в полочке при напряжении  $\sigma$ ;  $t_2$  – время прохождения волны в стенке на нейтральной линии при напряжении  $\sigma$ .

#### Результаты экспериментальных исследований

На рис. 1 показано полученное по результатам эксперимента изменение относительной скорости акустического сигнала, прошедшего через участок полки элемента балочной металлоконструкции под углом (углом прозвучивания). Излучатель и приемник в этом случае располагаются по одну сторону полки. Полученные статистические данные представляют линейную зависимость, что подтверждает теоретические исследования (рис. 2).

Метод был использован для определения одноосных напряжений растяжения-сжатия в режимах статического нагружения с предварительной подготовкой поверхности контроля.

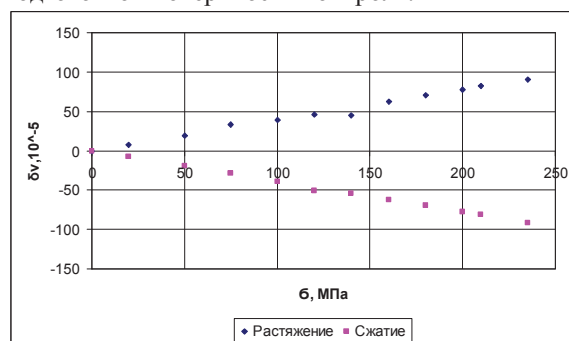


Рис. 1. Изменение относительной скорости акустического сигнала в зависимости от напряжения в металлоконструкции

Опытным путем получены акустоупругие коэффициенты связи зависимости (12) для материала сталь 3 (245), как основного для ответственных конструктивных элементов, что закладываются в проект. В результате, коэффициент учета толщины и плотности контактного слоя жидкости  $\alpha_R$  составил 0,5, а коэффициент учета силы прижатия преобразователей  $\alpha_P$  – 0,8 единиц. Полученные коэффициенты действительны для разработанного блока преобразователей, что своей конструкцией обеспечивает необходимый зазор между поверхностью объекта контроля и преобразователями, и с помощью постоянных магнитов силу их прижатия. Конструкция блока преобразователей обеспечивает сходимость и повторяемость эксперимента. Акустоупругие коэффициенты  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  для ука-

занного матеріала склали  $5,3 \pm 0,002$  і  $3,73 \pm 0,005$  МПа<sup>-1</sup> відповідно.

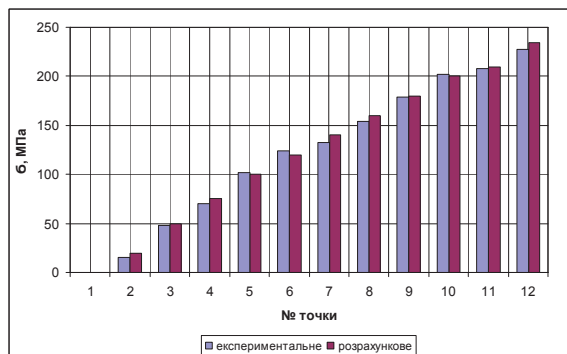


Рис. 2. Измерение методом акустоупругости и расчетные значения напряжения

Анализ значений одноосных напряжений растяжения и сжатия, измеренных напрямую в контрольных точках разработанным методом, и напряжений в этих точках, полученных в результате расчета, представлен на рис. 2. Погрешность полученных результатов не выходит за 5%, а относительная погрешность измерения временных интервалов не превышает 1 нс.

### Выводы

Таким образом, метод акустоупругости, реализованный с помощью углового прозвучивания, показал высокую точность и достоверность полученных результатов. Отклонение данных, полученных в полевых условиях на эксплуатируемых объектах торговых и промышленных комплексов, от теоретических составили 3-5% и вошли в пределы допустимых.

Анализ значений напряжений, напрямую измеренных акустоупругим методом в контрольных точках металлоконструкций промышленного объекта и напряжений в этих точках по результатам математического моделирования, позволил сделать следующие выводы:

- в точках расчетного максимального напряжения как для растяжения, так и сжатия, не противоречит данным длительных тензометрических измерений, и говорят о необходимости пересмотреть планирование расположения действующего оборудования на втором этаже торгового комплекса с целью разгрузки его несущих конструкций;

- проведение исследования в нескольких контрольных точках показало значительное превышение времени прохождения сигнала через металл для допустимого значения напряжения. Данные результаты были подтверждены контрольными визуальными-оптическими замерами и установлено превышение допустимого значения напряжения для элемента металлоконструкции и начала появления необратимых процессов предела текучести;

- проведение исследования в нескольких контрольных точках в одном разрезе балки показало

не пропорциональные значения скорости для напряжений сжатия и растяжений для верхней и нижней полк соответственно. Подобные значения говорят о наличии в элементе трещин, дефектов либо напряжений кручения. Был установлен перекос балки и смещение осей профилей на 0,5 см, что привело к деформации и появлению напряжений кручения.

По полученным результатам, можно сделать вывод о возможности продуктивного использования метода акустоупругости с угловым прозвучиванием для непосредственного измерения действующих напряжений в опасных зонах элементов балочных металлоконструкций, а также для проведения текущего контроля эксплуатируемых металлоконструкций.

По сравнению с существующими методами оценки напряженного состояния металла метод акустической тензометрии с угловым прозвучиванием позволяет выполнять диагностику с повышенной точностью на 40%. Применение рассмотренного метода не ограничивается элементами балочных металлоконструкций, а может применяться для неразрушающего контроля других видов строительных конструкций, находящихся в эксплуатации.

### Литература

1. Мишакин В. В. Диагностика материалов конструкций на ранних стадиях усталостного разрушения и оценка НДС материала конструкций методами неразрушающего контроля / В. В. Мишакин, Н. В. Данилова, К. В. Курашкин, В. А. Ключников, А. В. Гончар // Вестник СГАУ. – 2011. – № 3(27). Ч.1. – С. 299 – 307.
2. Никитина Н. Е. Акустоупругость. Опыт практического применения / Н. Е. Никитина. – Н. Новгород: ТАЛАМ, 2005. – 208 с.
3. Y. Kudryavtsev: Residual Stress, Springer Handbook on Experimental Solid Mechanics. Springer – SEM, (2008), p. 371 – 387.
4. Углов А. Л. Метод акустической безнулевой тензометрии и аппаратно-программный комплекс для его реализации / А. Л. Углов // Вестник ВГАВТ. Надежность и ресурсы в машиностроении. – С. 17 – 36.
5. Демченко М. О. Моделирование процессу контролю напружено-деформованого стану металлоконструкцій при експлуатації / М. О. Демченко, М. В. Філіппова, С. М. Матвієнко, А. Л. Іваніцька // Вісник КрНУ. – Кременчук: КДПУ. – 2014. – Вип. 4/2014 (87). – С. 105 – 110.
6. Демченко М. О., Система неруйнівного контролю балочних елементів промислових споруд / М. О. Демченко, М. В. Філіппова, В. М. Безручко // Системи обробки інформації. – Х.: Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба. – 2015. – Вип. 6 (131). – С. 39 – 42.

7. Бобренко В. М. Акустическая тензометрия (теория и практика) / В. М. Бобренко, А. Н. Ку-

ценко, М. С. Вангели. – Кишинев: Штиинца, 1991. – 204 с.

УДК 624.014:620.179.16

**М. В. Філіппова, Г. А. Богдан, М. О. Демченко**

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна*

### ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ЕЛЕМЕНТІВ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ МЕТОДОМ АКУСТИЧНОЇ ТЕНЗОМЕТРІЇ

З метою удосконалення методу визначення фактичних механічних напружень у металоконструкціях запропоновано використання нової методики проведення їх контролю при експлуатації. У порівнянні з існуючими методами вона має переваги щодо точності одержуваних результатів.

Метою роботи є проведення теоретичного дослідження впливу зовнішніх факторів навколишнього середовища на відносну зміну швидкості акустичного сигналу та отримання емпіричної залежності напруження в металоконструкціях від часу проходження поперечних хвиль в місці діагностики. Як значення швидкості для ненавантаженого матеріалу запропоновано використання результатів прозвучування на нейтральній лінії профілю балки.

Використання даної методики дозволяє виявити дійсні напруги в елементах балкових металоконструкцій промислових споруд без розвантаження конструкції.

**Ключові слова:** металоконструкції, напружений стан, ультразвуковий контроль.

**M. Filippova, G. Bogdan, M. Demchenko**

*National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine*

### THE DETERMINATION OF THE STRESS CONDITION IN ELEMENTS OF STEEL STRUCTURES WITH THE METHOD OF ACOUSTIC TENSOMETRY

The determination of the stress condition in elements of steel structures with the method of acoustic tensometry is discussed in the paper. The paper examines the establishment of the dependence of the influence of the stress condition on the relative variation in the speed of an acoustic wave applied to the elements of steel beam structures.

It was offered to use a new approach to the implementation of acoustic nondestructive testing for the diagnosis of the stress condition of supporting structures of plant facilities. The impact of external conditions on variations in the speed of an acoustic signal was evaluated. Analytical dependence of the effect of the stress condition of the metal on the relative variation in the speed of an acoustic signal for elements of steel beam structures working in bending was derived. The acoustoelastic coupling coefficient for the relative variation in the speed of an acoustic wave from the stress condition of the metal in elements of steel structures have been derived from the experiments. The devised method was implemented using an angular scanning test for shelves and a wall of the element of a steel beam structure.

This method allows to determine the actual stress in the elements of beam steel structures of plant facilities without relieving a structure.

**Key words:** a steel structure, stress condition, an acoustic signal, tensometry.

*Надійшла до редакції  
15 березня 2016 року*

*Рецензовано  
29 березня 2016 року*

© Филиппова М. В., Богдан Г. А., Демченко М. А., 2016